

Nueva tecnología de construcción mixta ligera acero-madera para edificios sismo-resistentes

Edgar Segués^a, Inmaculada R. Cantalapiedra^b, Francisco López Almansa^a

^aDepartamento de Tecnología de la Arquitectura, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona;

^bDepartamento de Física, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona
edgar.segues@upc.edu

Palabras clave: Edificios de Entramado ligero de madera (*"Timber platform frame buildings"*), resistencia sísmica, construcción mixta acero-madera.

Resumen

Este trabajo describe una nueva técnica de construcción mixta de madera y acero. Esta solución constructiva está destinada principalmente a proporcionar alta resistencia lateral y rigidez, cualidades útiles para resistir fuerzas de origen eólico y sísmico; consiste en la combinación en paralelo de un entramado ligero de madera (*"timber platform frame"*) y un sistema de arriostramiento autoportante de acero. Las responsabilidades estructurales de cada sistema están bien separadas: la madera resiste las cargas gravitacionales y el acero los empujes laterales generados por el viento o por la acción sísmica. Es destacable que, contrariamente a lo que sucede en sistemas clásicos de arriostramiento, esta separación es prácticamente completa: las cargas verticales no afectan en absoluto al sistema de arriostramiento de acero (excepto su peso propio, obviamente) y los empujes laterales sólo generan tensiones en las zonas de la estructura de madera más próximas a las conexiones con el acero. En otras palabras, los elementos de madera se pueden dimensionar independientemente del viento y de las acciones sísmicas. Dado que los edificios de entramados ligeros de madera son bastante débiles en dirección horizontal, parece haber un límite alrededor de las seis plantas de altura; el objetivo principal de este trabajo es mostrar que esta limitación puede ser fácilmente superada utilizando la tecnología propuesta. En consecuencia, se proyecta un sistema de arriostramiento lateral para un edificio de seis pisos situado en una zona de alta sismicidad. Los resultados muestran que la incorporación de elementos de acero más bien ligeros puede proporcionar la capacidad lateral requerida.

Introducción

Actualmente la construcción de edificios de madera está en aumento debido a los criterios medioambientales y de sostenibilidad cada vez más aplicados por las normativas de los diferentes países para dar respuesta a los objetivos de reducción de emisiones de CO₂.

Los países nórdicos fueron de los primeros en reducir las restricciones de altura que las normativas aplicaban a los edificios con estructuras de madera (1). Dichas restricciones daban respuesta a la seguridad en caso de incendio y las nuevas normas han ido rebajando las limitaciones de altura y sustituyéndolas por la aplicación de otras medidas de seguridad frente al fuego, lo que ha permitido que se proyecten edificios de madera de mayor altura. Los cambios normativos y, por ejemplo, retos como la construcción de un rascacielos en madera en Canadá (2) han provocado de nuevo el interés por el análisis de la respuesta de este tipo de edificios frente a cargas laterales como el viento y el sismo.

Respuesta frente a acciones horizontales de los edificios de entramado ligero de madera

Por regla general, los edificios de entramado ligero de madera son una buena opción para construir en zonas de alta sismicidad debido a la ligereza que aporta la madera como material de construcción. Las estructuras de madera pesan aproximadamente 3 veces menos que las de acero o las de hormigón armado, por lo que en caso de sismo las fuerzas generadas también son menores. Además, la madera tiene otras propiedades que influyen en la buena respuesta de estos edificios ante terremotos, tales como su notable flexibilidad y su alto amortiguamiento. No obstante, la ductilidad de la madera es más bien limitada y ello resulta un factor clave en la respuesta ante acciones cíclicas como las generadas por el sismo y el viento; en este aspecto las estructuras de madera presentan algunas limitaciones.

La estabilidad frente a cargas laterales de los entramados ligeros de madera se debe a al efecto pantalla de sus muros (3). Éstos se conforman por la unión mediante clavos del entramado a un tablero de madera. El tablero aporta rigidez en sentido lateral y los clavos proporcionan ductilidad, debido a la alta capacidad de deformación del acero. Además, dichos muros también requieren herrajes de anclaje en la base y de unión entre plantas para garantizar una correcta transmisión de los esfuerzos ante empujes laterales.

Otro factor clave es la capacidad de disipación de energía. Un terremoto se puede interpretar como un movimiento impuesto al edificio que le transmite una determinada cantidad de energía. Si el edificio puede disipar o absorber dicha energía minimizando los daños y evitando que éstos se produzcan en elementos clave de la estructura, ello garantizará la seguridad de sus ocupantes. En consecuencia, la disipación de energía de las conexiones es crucial. Las uniones tipo clavija (clavos, pernos, etc.) presentan algunos inconvenientes en este sentido. Concretamente, ante una sollicitación cíclica de la conexión se produce el efecto pinzamiento (“pinching”), consistente en un incremento del deslizamiento sin aumento de la fuerza. Numerosas investigaciones analizan dicho problema intentando evitar este efecto y mejorar así la capacidad de disipación de energía (4) (5) (6).

Otra solución para mejorar la respuesta frente al sismo de este tipo de edificios son los disipadores de energía, dispositivos anexos a la estructura que actúan a modo de fusible estructural en caso de sismo. Se intenta concentrar el daño en estos elementos durante

un sismo incrementando así la capacidad de disipación de energía de la estructura; estos elementos pueden ser fácilmente sustituidos una vez pasado el sismo (7). Cuando éstos son usados en una estructura de madera deben ir unidos a la misma, y esa unión acaba siendo un punto crítico debido a la concentración de tensiones y a la limitación de resistencia por aplastamiento o rasgado de la madera. Por dicho motivo muchos trabajos apuntan a aumentar la superficie de contacto entre acero y madera o bien a colocar un gran número de disipadores en el edificio (8).

Otra limitación de los entramados ligeros son las dimensiones de las oberturas, problemática que se agrava en la parte inferior de los edificios donde se requiere de grandes aperturas, ya sea por la existencia de un garaje o bien de un local comercial, lo que acaba generando que en caso de sismo se produzcan los efectos de asimetría en planta y planta baja débil (“Soft first story”) (9).

Nueva tecnología propuesta

Se propone un nuevo sistema constructivo mixto madera – acero (Fig. 1). Éste consiste en la unión de una estructura de entramado ligero de madera con un arriostramiento triangulado autoportante de acero de manera que el entramado se diseña para soportar cargas verticales y la estructura de acero para resistir empujes horizontales.

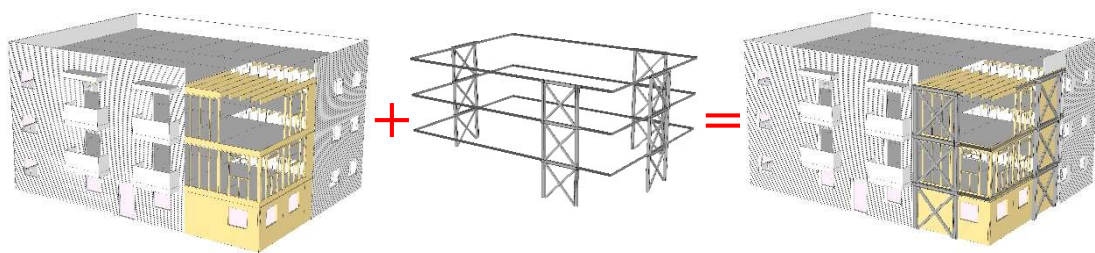


Figura 1. Sistema estructural propuesto MADERA-ACERO

La innovación de dicho sistema consiste en que la unión entre los dos elementos se realiza a través de una especie de cinturones metálicos en los forjados; estos elementos están encargados de transmitir las cargas laterales entre los dos elementos (Fig. 2). Dicho sistema es bastante óptimo, puesto que en caso de sismo las fuerzas horizontales se originan en los forjados y los cinturones permiten aumentar la superficie de contacto entre acero y madera evitando así el aplastamiento de la misma y sacando provecho del efecto diafragma rígido.

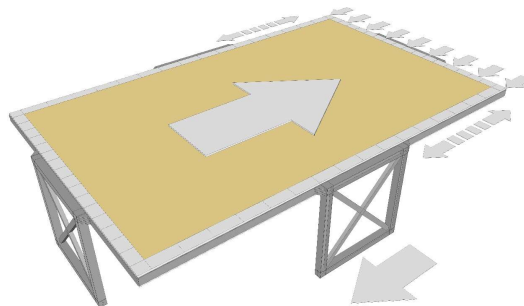


Figura 2. Conexión entre forjados y arriostramiento

Ejemplo de aplicación

Se ha aplicado la tecnología propuesta a un edificio de 6 plantas de entramado ligero proyectado para ser construido en una zona de alta sismicidad (10). El edificio original tiene una planta de superficie aproximada $21 \times 31 \text{ m}^2$ y una altura de 18 m. Los tableros de los muros de diafragma que dan rigidez en dirección horizontal son de contrachapado de 19 mm de espesor en las 2 plantas inferiores, 15 mm en las dos plantas intermedias y de 12 mm en las dos plantas superiores.

El peso total del edificio es de 11.000 kN, la aceleración sísmica es 0,5 g, el factor de importancia es 1, el coeficiente de suelo es $S = 2$, el período fundamental es 0,6 s y el factor de ductilidad considerado es $R = 4$ (conocido como q en la normativa europea). El cortante basal obtenido mediante aplicación del método de fuerzas laterales equivalentes es 1.650 kN para cada dirección del edificio.

La estructura metálica que se propone a modo de arriostramiento en sentido horizontal consiste en 4 pórticos triangulados (tipo cercha vertical) situados en cada una de las fachadas. La distancia entre pilares es de 4 m y la altura de cada planta es de 3 m (Fig. 3); la distribución vertical de las cargas consideradas se muestra en la Tabla 1 (Fig. 3).

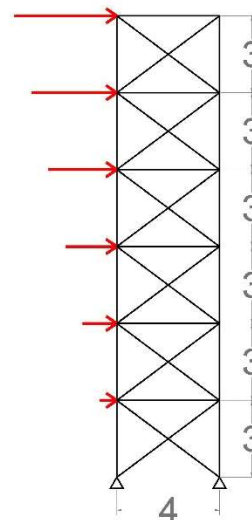


Figura 3. Esquema de un arriostramiento

Tabla 1. Distribución vertical de cargas de un arriostramiento.

Planta	1	2	3	4	5	6
Carga [KN]	39,29	78,57	117,86	157,14	196,43	235,71

Siguiendo las indicaciones del artículo 6.7.3 del Eurocódigo 8, para la realización del análisis estructural se ha ignorado la contribución de las barras diagonales comprimidas. Acorde a la Instrucción de Acero Estructural EAE, se ha dimensionado la estructura para que todas las secciones sean de Clase 1 (PLÁSTICAS). Se ha usado acero S 355 y secciones tubulares cuadradas. Las dimensiones obtenidas se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Dimensiones de las secciones propuestas.

Planta	Sección Barras Verticales y Horizontales [largo.ancho.espesor mm]	Sección Barras Diagonales [largo.ancho.espesor mm]
6	80.80.8	50.50.5
5	100.100.10	80.80.6
4	100.100.10	80.80.8
3	150.150.12,5	100.100.8
2	180.180.12,5	100.100.10
1	220.220.12,5	100.100.10

Conclusiones

Los resultados obtenidos indican la viabilidad de la solución propuesta y permiten pensar en posibles aplicaciones tanto en nueva edificación como en edificación existente. Considerado el volumen del edificio y la hipótesis de alta sismicidad usada en el análisis, se puede afirmar que se obtienen unas secciones de proporciones razonables, incluso reducidas para un edificio de 6 plantas, lo que permite que la parte de acero del sistema también sea ligera. El aumento de la resistencia del acero de S 275 a S 355 permite seguir obteniendo secciones de Clase 1. Minimizar el momento de inercia de las secciones en el plano del pórtico permite optimizar la estructura reduciendo la tensión de las barras. El uso de uniones articuladas optimiza la estructura metálica pero constructivamente resulta muy complicado. No obstante, las tensiones que se derivan con articulaciones rígidas pueden ser soportadas por la estructura. El coeficiente de esbeltez obtenido en la comprobación a pandeo de los elementos más esbeltos es $\chi = 0,33$.

En resumen, los resultados obtenidos son motivantes para profundizar en la idea propuesta y afrontar los retos futuros solucionando las limitaciones detectadas y perfeccionando la propuesta.

Referencias

- (1) Shmuelli, & Kagami. Progress of timber multi-storey apartment building in Europe and Japan. *Structural Building Components Association SBCA*. **2009**.
- (2) Green MC; Karsh JE. The Case for Tall Wood Buildings. How Mass Timber Offers a Safe, Economical, and Environmentally Friendly Alternative for Tall Building Structures. *Canadian Wood Council*. **2012**
- (3) Hoekstra T. Multi-storey timber frame building – Modelling the racking stiffness of timber-frame shear-walls. *MSc Thesis. TU Delft*. **2012**
- (4) Leijten AJM; Ruxton S; Prion H; Lam F. Reversed-cyclic behavior of a novel heavy timber tube connection. *Journal of Structural Engineering*. **2006**, 132:1314-1319.
- (5) Awaludin, A.; Hayashikawa; T. Oikawa; A.; Hirai, T.; Sasaki, Y.; Leijten; A.J.M.; Seismic Properties of Moment-resisting Timber Joints with a Combination of Bolts and Nails. *Civil Engineering Dimension*. **2011** Vol. 13, No. 1, 1410-9530
- (6) Yoshikazu Araki; Toshiki Endo; Manami Iwata. *The Japan Wood Research Society* **2011**
- (7) Francisco López-Almansa; Edgar Segué; Inmaculada R. Cantalapiedra. A new steel framing system for seismic protection of timber platform frame buildings. Implementation with hysteretic energy dissipators. *Earthquake Engineering Structural Dynamics*. **2014**
- (8) Kawai N; Araki Y; Koshihara M; Isoda H. Seismic dampers for rehabilitating vulnerable Japanese wood houses. *9th World Conference on Timber Engineering (WCTE)*. **2006**
- (9) A. Iqbal. Seismic Retrofit solutions for light timber frame buildings with soft first story. *Proceedings of the NZSEE Conference* **2013**
- (10) Milburn J; Banks W. Six-Level Timber Apartment Building in a High Seismic Zone. *New Zealand Timber Design Journal*. **2004**.